

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОЙ ГЕЛИОГЕОФИЗИКЕ



ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОЙ ГЕЛИОГЕОФИЗИКЕ

Под редакцией академика РАН Л.М. Зелёного,
чл. - корр. РАН А.А. Петруковича
и д.ф.-м.н. И.С. Веселовского



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2018

УДК 523; 533.9
ББК 22.65; 22.632
С 56



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 18-12-00012,
не подлежит продаже

*Рукопись подготовлена
в рамках Программы 22 фундаментальных исследований Президиума РАН 2012–2014 гг.
«Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы»
и в рамках Программы Отделения физических наук РАН 2012–2015 гг. ОФН-15
«Плазменные процессы в космосе и в лаборатории»*

Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Под ред. Л.М. Зелёного, А.А. Петруковича, И.С. Веселовского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 688 с. — ISBN 978-5-9221-1796-8.

Плазменная гелиогеофизика занимается описанием процессов, происходящих в космическом пространстве между поверхностью Солнца и атмосферой Земли в рамках электродинамики и физики плазмы. Изданная ранее монография (Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зелёного, И.С. Веселовского. В 2 т. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008) включает обзоры по физике Солнца, солнечного ветра, гелиосфере, магнитосфере и ионосфере Земли и планет, солнечно-земным связям, взаимодействию солнечного ветра с различными объектами Солнечной системы, пылевой плазме, основным понятиям физики плазмы.

Настоящая книга написана ведущими российскими специалистами и отражает современный уровень исследований, основные достижения и проблемы по нескольким приоритетным направлениям космической физики плазмы: долговременным измерениям солнечной активности, свойствам солнечных пятен и магнитных полей, современным наблюдениям структуры солнечного ветра, физике токовых слоев в магнитосферах, динамике ионосферы и атмосферы, некоторым смежным вопросам теории плазмы и астрофизики.

Предназначена специалистам в области физики плазмы, космической физики, студентам старших курсов и аспирантам.

Рецензенты:

А.Б. Струминский, А.М. Садовский

ISBN 978-5-9221-1796-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2018

© ИКИ РАН, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
I. Солнце и солнечная активность	
I.1. Глобальные климатические изменения, современное потепление, солнечная активность и космические лучи. <i>В. А. Дергачёв, И. В. Кудрявцев, Ю. А. Наговицын, М. Г. Огурцов</i>	9
I.2. Климатические индикаторы периодичности солнечной активности от десятков тысяч до сотен миллионов лет тому назад. <i>О. М. Распопов, В. А. Дергачёв</i>	28
I.3. Измерение корональных магнитных полей радиоастрономическими методами. <i>В. М. Богод</i>	59
I.4. Основные свойства солнечных пятен: равновесие, устойчивость и собственные колебания мелкого солнечного пятна. <i>А. А. Соловьёв</i>	86
II. Солнечный ветер и гелиосфера	
II.1. Прогресс в изучении солнечного ветра методом радиопросвечивания. <i>А. И. Ефимов, Л. А. Луканина, А. И. Рогашкова, Л. Н. Самознаев, И. В. Чашей, М. К. Бёрд, М. Петцольд</i>	117
II.2. Новые сведения о солнечном ветре, полученные на основе измерений с очень высоким временным разрешением. <i>Г. Н. Застенкер</i>	144
II.3. Результаты мониторинга турбулентного солнечного ветра по измерениям межпланетных мерцаний вблизи минимума 23/24 цикла солнечной активности. <i>И. В. Чашей, В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, С. К. Глубокова, А. В. Глянецев, И. А. Субаев</i>	158
III. Магнитосфера и токовые слои	
III.1. Токовые слои в хвосте магнитосферы Земли. <i>А. А. Петрукович, А. В. Артемьев, И. Ю. Васько, Л. М. Зелёный, Р. Накамура</i>	173
III.2. Особенности внутренней структуры токовых слоев в бесстолкновительной плазме в присутствии широкой компоненты магнитного поля. <i>Х. В. Малова, О. В. Мингалев, В. Ю. Попов, А. А. Петрукович, Л. М. Зелёный</i>	222
III.3. Неадиабатическое ускорение ионов в токовом слое геомагнитного хвоста и структура пограничного плазменного слоя. <i>Е. Е. Григоренко, Л. М. Зелёный</i>	261
III.4. Фронты диполизации: структура, динамика и ускорение частиц. <i>А. В. Артемьев, Е. В. Панов, А. А. Васильев</i>	334
III.5. Основные особенности магнитной структуры, эволюции нагрева и ускорения плазмы в токовых слоях, создаваемых в лабораторных условиях. <i>А. Г. Франк, Н. П. Кирий</i>	377
III.6. Лабораторные эксперименты с террелой: влияние кинетических масштабов на физическое подобие планетарным магнитосферам. <i>В. М. Антонов, Э. Л. Бояринцев, Ю. П. Захаров, А. В. Мелехов, В. Г. Посух, А. Г. Пономаренко, И. Ф. Шайхисламов</i>	396
IV. Ионосфера и верхняя атмосфера	
IV.1. Изменчивость ионосферы. <i>М. Г. Дёминов</i>	421
IV.2. Глобальный отклик системы термосфера-ионосфера на внезапные стратосферные потепления. <i>Ю. Н. Кореньков, М. В. Клименко, В. В. Клименко, Ф. С. Бес-сараб</i>	437

IV.3.	Исследование воздействия солнечной активности и солнечного ветра на ионосферу Земли с помощью сигналов навигационных систем, зарегистрированных на трассах спутник-спутник. <i>А. Г. Павельев, С. С. Матюгов, О. И. Яковлев, А. А. Павельев, В. Н. Губенко, В. А. Ануфриев</i>	511
IV.4.	Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от наземных источников акустико-гравитационных волн. <i>И. В. Карпов, С. П. Кшевецкий</i>	534
IV.5.	Электрические разряды в тропосфере над сейсмическим регионом и их влияние на распространение УК-радиоволн. <i>В. М. Сорокин, А. К. Яценко</i>	546
IV.6.	Радиозатменные исследования внутренних волн и слоистых структур в атмосферах Земли, Марса и Венеры. <i>В. Н. Губенко, А. Г. Павельев, В. Е. Андреев, И. А. Кириллович, Р. Р. Салимзянов</i>	560

V. Общие вопросы теории плазмы

V.1.	МГД-волны и неустойчивости бесстолкновительной космической плазмы: 16-моментное приближение. <i>В. Д. Кузнецов, Н. С. Джалилов</i>	569
V.2.	Плазменные неустойчивости и ускорение частиц ударными волнами в остатках сверхновых звезд. <i>А. М. Быков, С. М. Осипов</i>	585
V.3.	Поглощающая сфера в бесстолкновительной плазме, старая задача в свете новых подходов. <i>В. Л. Красовский, А. А. Киселёв, М. С. Долгоносков</i>	605
V.4.	Квантовые поправки к константам скоростей термоядерных реакций в условиях плазмы Солнца. <i>А. Н. Старостин, М. Г. Гладуш, Ю. В. Петрушевич</i>	631
V.5.	Лунный грунт и долговременные вариации потоков солнечного ветра. <i>Г. С. Ануфриев</i>	658

Научное издание

**СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ
В ПЛАЗМЕННОЙ ГЕЛИОГЕОФИЗИКЕ**

Редактор *О.В. Салецкая*

Оригинал-макет: *А.М. Садовский*

Оформление переплета: *А.Н. Захаров*

Подписано в печать 26.12.2018. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 55,9. Уч.-изд. л. 63,5. Тираж 300 экз. Заказ № 343

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б

Е-mail: porsova@fml.ru, sale@fml.ru

Сайт: <http://www.fml.ru>

Интернет-магазин: <http://www.fmllib.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства
в ООО «Типография «Перфектум»
428000, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса, 52

III.2. ОСОБЕННОСТИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ В ПРИСУТСТВИИ ШИРОВОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Х. В. Малова^{1,2}, О. В. Мингалева³, В. Ю. Попов^{2,4,5}, А. А. Петрушин²
Л. М. Зелёный²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва, Россия
hmalova@yandex.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³ Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск, Россия

⁴ Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Построены самосогласованные модели тонких токовых слоев в бесстолкновительной плазме с учетом сдвиговой (шировой) компоненты магнитного поля: аналитическая и численная. Исследованы токовые равновесия в присутствии: 1) глобальной (постоянной в слое) сдвиговой компоненты $B_y = \text{const}$; 2) самосогласованной сдвиговой компоненты B_y ; 3) сдвиговой компоненты смешанного типа, включающей в себя как постоянную, так и переменную составляющие. Проведен анализ равновесий и динамики частиц в широком диапазоне параметров модели. Показано, что по сравнению со случаем $B_y \equiv 0$, структура токового слоя в присутствии сдвиговой компоненты может существенным образом меняться, что обусловлено изменением динамики частиц, пересекающих токовый слой. Изучены механизмы формирования асимметричных токовых равновесий.

1. Введение

Тонкие токовые слои (ТТС) с толщиной порядка ионного гирорадиуса играют важную роль в плазменных системах разных масштабов. Многочисленные спутниковые измерения в околоземном пространстве [Sergeev et al., 1996; Yamada et al., 2007], лабораторные эксперименты [Yamada et al., 2010; Frank et al., 2011] и наблюдения за астрофизическими объектами [Arons, 2011] указывают на то, что именно эти магнитоплазменные структуры ответственны за процессы нагрева и высвобождения энергии магнитного поля, такие как солнечные вспышки, коронарные бури и суббури, процессы пересоединения в космической и лабораторной плазме. Несмотря на более чем полувековую историю создания кинетических моделей токовых слоев (см. обзор [Зелёный и др., 2011]), эта тематика до сих пор является актуальной для построения непротиворечивой теории и интерпретации экспериментальных данных.

На рис. 1 показано схематическое изображение меридионального разреза магнитосферы Земли. Здесь и далее мы используем солнечно-магнитосферную систему координат (GSM), в которой ось X направлена от центра Земли к Солнцу, ось Z — с юга на север, а ось Y — с утреннего сектора на вечерний. Магнитное поле Земли, обозначенная пунктирной линией, разделяет магнитное поле солнечного ветра и собственное магнитное поле Земли. В центральной части хвоста магнитосферы располагается токовый слой, где с утренней стороны на вечернюю течет ток.